

第32卷 第2期

海洋环境科学

Vol. 32, No. 2

2013年4月

MARINE ENVIRONMENTAL SCIENCE

April 2013

# 海南珊瑚礁区鱼体中重金属污染特征 及生态风险评价

刘金铃<sup>1</sup>, 徐向荣<sup>1</sup>, 丁振华<sup>2</sup>, 靳明华<sup>2</sup>, 王帅龙<sup>1</sup>, 郝青<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所 海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 厦门大学 环境与生态学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为研究海南珊瑚礁区重金属的污染现状, 选择鱼类为污染指示物, 测定珊瑚礁区的5种鱼体中Cr、Mn、Cu、Zn、As、Pb和Hg 7种重金属的含量, 并采用单因子污染指数法( $P_i$ )对重金属的污染状况进行了风险评价。研究结果显示, 不同鱼类对同种重金属元素的富集能力存在较大差异, 同种鱼对不同重金属元素的富集能力也存在差异。珊瑚礁区鱼类重金属的污染程度由强到弱的顺序为: Cr > As > Mn > Hg > Zn > Cu > Pb; 鱼类的鳃和内脏器官比肌肉更容易蓄积重金属。珊瑚礁区生物富集作用最明显的为Cr和As。 $P_i$ 结果表明海南珊瑚礁区鱼体重金属Cr的污染严重, As中度污染, 其他重金属基本无污染或轻度污染。

**关键词:** 重金属; 鱼; 珊瑚礁; 生态风险

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2013)02-0262-05

## Heavy metals contamination in fish from coral reef ecosystem and ecology risk evaluation

LIU Jin-ling<sup>1</sup>, XU Xiang-rong<sup>1</sup>, DING Zhen-hua<sup>2</sup>, JIN Ming-hua<sup>2</sup>, WANG Shuai-long<sup>1</sup>, HAO Qing<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. College of the Environment &amp; Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** To study the pollution status quo of heavy metals in coral reef ecosystem in Hainan Island, concentrations of heavy metals including Cr, Mn, Cu, Zn, As, Pb and Hg in wild fish were determined. Single factor pollution index ( $P_i$ ) was employed to evaluate the heavy metal pollution level. The results showed that enriched degree of the heavy metals in fish can be ranked from high to low as Cr > As > Mn > Hg > Zn > Cu > Pb; heavy metals prefer to be accumulated in gill and viscera. Obvious bioaccumulation of Cr and As in fish of coral reef ecosystem was observed.  $P_i$  indicated that coral reef ecosystem in Hainan Island has been heavily polluted by Cr and moderately polluted by As. Other metals have shown no pollution or slight pollution.

**Key words:** heavy metal; fish; coral reef; risk assessment

海南岛是中国仅次于台湾岛的第二大岛, 具有丰富的珊瑚礁资源<sup>[1]</sup>, 也是我国旅游业发达的地方。在人类活动的影响下, 20世纪90年代以来海南海水重金属污染呈恶化趋势<sup>[2-3]</sup>。随着海南国际旅游岛建设的逐步推进, 人类活动对其周边海洋环境, 尤其是珊瑚礁生态系统的影响不断增大。珊瑚礁是海洋中生产力水平极高的生态系统之一, 被称为是热带海洋沙漠中的绿洲和海洋中的

热带雨林<sup>[4]</sup>。珊瑚礁生态系统对维持渔业经济、保障生物多样性、生物生产率和生态平衡等具有重要作用。但是珊瑚礁也是一个相对脆弱的生态系统, 易受外界环境变化的影响, 尤其易受到废水排放、采矿、海洋轮船运输等的影响<sup>[5-7]</sup>, 导致珊瑚礁生态系统受到如重金属、农药、有机污染物等污染物的严重污染。相对于其它污染物而言, 重金属容易被生物吸收, 长期残存于生物体内, 最终

收稿日期: 2012-10-13, 修订日期: 2012-11-29

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M510201); 中国科学院百人计划资助项目(2060299); 中国科学院南海海洋研究所知识创新工程领域前沿项目(50601-31)

作者简介: 刘金铃(1983-), 女, 湖北省潜江市人, 博士, 目前主要从事海洋环境中重金属的迁移转化研究, E-mail: liujinling@scsio.ac.cn

通过食物链转移至高营养级的生物,进而威胁到人体健康<sup>[8-9]</sup>。研究珊瑚礁区重金属污染情况,不仅对了解重金属对珊瑚礁生态系统的潜在生态危害,而且对掌握海产品安全具有重要意义。鱼类是监测环境污染的重要生物指示物<sup>[10-11]</sup>,常用于描述环境的污染状况和生态效应。本研究分析了海南珊瑚礁生态系统中鱼类重金属(Cu、Pb、Zn、Mn、Cr、Hg和As)的含量及其分布特征,评估重金属污染对海南珊瑚礁的潜在生态危害,为海南珊瑚礁的保护与可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

参照海洋监测规范(GB 17378-2007)方法<sup>[12]</sup>,于2012年3月在海南岛沿海(文昌、儋州、琼海和三亚等)采集主要生活在珊瑚礁区域的鱼类,种类包括斑鳍鲷(*Scorpaena neglecta*)、深海骨鰽(*Ostichthys kaianus*)、马夫鱼(*Heniochus acuminatus*)、新月鹦嘴鱼(*Scarus lunula*)、单斑笛鲷(*Lutjanus monostigma*)等。样品采集后置于冷藏箱中,立即运到实验室后,冷冻保存至分析。

### 1.2 样品处理与分析方法

鱼样解冻后,用去离子水洗净、晾干,测量体长和体重;用不锈钢剪刀和解剖刀将其分解为肌肉、鳃、内脏等组织。分解出来的各个组织,置于聚乙烯袋中-20℃冷冻保存。样品经冷冻干燥后,用不锈钢样品粉碎机研磨后,过200目筛,混合均匀后,置于聚乙烯袋中冷冻保存。

样品中Cu、Pb、Zn、Mn、Cr和As的分析参照Mustafa的方法<sup>[13]</sup>:称取0.1g(精确到0.001g)干样,置于100mL聚四氟乙烯消解罐中,依次加入10mL HNO<sub>3</sub>(1mol/L),1mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(30%),盖好消解罐置于微波消解炉中消解,消解条件为:250W,180℃,2min;0W,180℃,2min;250W,200℃,6min;400W,210℃,5min;550W,210℃,8min;冷却8min。用超纯水稀释消解液至10mL后,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,型号DRC-e,美国PE公司)分析测定。样品中Hg的分析参照王翠萍等的方法<sup>[14]</sup>使用Lumex测汞仪(Lumex公司,俄罗斯)直接测定干样。采用生物样品标准物质Tort-2(NRCC,加拿大)、空白和重复样进行质量控制。标准样品回收率分别为Cu 100.5%、Pb 85.9%、Zn 92.1%、Mn 108.1%、Cr 102.5%、As 101.8%、Hg 95.5%,平行样相对标准偏差<10%,达到质量标准要求。

### 1.3 评价方法

对于生物体污染状况评价,目前国际国内尚未有权威的评价标准。本文选择单因子污染指数法<sup>[15]</sup>,其表达式如下:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: $P_i$ 为单因子污染指数; $C_i$ 为样品中重金属*i*的实测含量; $S_i$ 为重金属*i*的评价标准值,考虑到研究对象为海洋鱼类,故以我国海洋生物污染评价标准<sup>[16]</sup>中重金

属的限值作为评价标准。由于该标准中不含Mn,故Mn的评价标准参照世界卫生组织<sup>[17]</sup>制定的重金属限值( $4.00 \times 10^{-6}$ ,干重)计算。根据单因子污染指数的计算结果将重金属的污染水平划分为4个等级: $P_i \leq 0.2$ 时,表示无污染; $0.2 < P_i < 0.6$ 时,表示轻度污染; $0.6 \leq P_i < 1.0$ 时,表示中度污染; $P_i \geq 1.0$ 时,表示重度污染。

## 2 结果与讨论

### 2.1 珊瑚礁区鱼类肌肉组织中的重金属含量

海南珊瑚礁区5种鱼类肌肉组织中Cr、Mn、Cu、Zn、As、Pb和Hg的含量见表1。5种鱼类肌肉组织中的Mn、Cu、Zn、Pb和Hg含量较低,且均低于我国海洋生物污染评价标准<sup>[16]</sup>、《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》<sup>[18]</sup>、《食品中污染物限量》<sup>[19]</sup>,低于澳大利亚国家卫生和医学研究理事会制定的人体消费卫生标准<sup>[20]</sup>,以及世界卫生组织(WHO)制定的鱼体中重金属元素的最大限值<sup>[17]</sup>。对于Cr而言,虽然在5种鱼类肌肉组织的含量都远低于人体消费卫生标准,但是深海骨鰽和新月鹦嘴鱼体肌肉组织中Cr含量超过我国《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》( $8.00 \times 10^{-6}$ ,干重)和《食品中污染物限量》( $8.00 \times 10^{-6}$ ,干重),且5种鱼类肌肉组织的Cr含量最大值均超过海洋生物污染评价标准( $6.00 \times 10^{-6}$ ,干重)。对于As元素而言,除新月鹦嘴鱼肌肉组织中As含量远超过《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》( $20.00 \times 10^{-6}$ ,干重)和《食品中污染物限量》( $20.00 \times 10^{-6}$ ,干重)外,其余4种鱼体肌肉组织中As含量均低于这两类限量。这说明珊瑚礁区中的斑鳍鲷、单斑笛鲷、深海骨鰽、马夫鱼、新月鹦嘴鱼5种鱼体肌肉中Mn、Cu、Zn、Pb和Hg5种元素含量均在安全范围内,而Cr超过安全范围;新月鹦嘴鱼肌肉中Cr和As超过安全范围。这表明珊瑚礁区中海鱼受到Cr和As的污染。

重金属在不同种类鱼的肌肉中的含量差异显著(ANOVA方差分析 $P < 0.05$ )。如Cr在5种鱼体肌肉中的含量大小顺序为:新月鹦嘴鱼>深海骨鰽>单斑笛鲷>斑鳍鲷>马夫鱼;Mn在5种鱼体肌肉中的含量大小顺序为:马夫鱼>新月鹦嘴鱼>深海骨鰽>斑鳍鲷>单斑笛鲷;As在5种鱼体肌肉中的含量大小顺序为:新月鹦嘴鱼>深海骨鰽>斑鳍鲷>单斑笛鲷>马夫鱼;Hg在5种鱼体肌肉中的含量大小顺序为:斑鳍鲷>深海骨鰽>单斑笛鲷>新月鹦嘴鱼>马夫鱼。这说明不同种类的鱼对重金属的富集能力不同,这与不同种类鱼的生活行为、食性、新陈代谢活动等因素有关<sup>[21]</sup>。如Balasubramanian等发现不同鱼种体内重金属的蓄积水平高低依次为杂食性>浮游生物摄食>浮游的动物摄食>肉食性>大型藻类摄食<sup>[22]</sup>。本研究中,新月鹦嘴鱼是杂食性鱼种,主要以珊瑚礁上的藻类和珊瑚的软质部分为食。而其他4种均为肉食性鱼种。从食性上来看,与其他鱼种相比,杂食性的新月鹦嘴鱼对重金属Cr和As的富集能力最强。马夫鱼

表 1 珊瑚礁区中鱼类肌肉中重金属含量  
Tab. 1 Concentrations of heavy metals in the muscles of five wild fishes from coral reef ecosystem

项目	数量/尾	$w/10^{-6}$ (干重)						
		Cr	Mn	Cu	Zn	As	Pb	Hg
斑鳍鲷	4	3.00 ~ 7.36 (5.18)	0.27 ~ 0.49 (0.47)	ND ~ 0.59 (0.52)	3.39 ~ 6.47 (4.93)	2.66 ~ 9.11 (5.88)	0.03 ~ 0.15 (0.09)	0.35 ~ 0.38 (0.37)
单斑笛鲷	4	3.79 ~ 9.22 (6.50)	0.29 ~ 0.47 (0.38)	ND ~ 1.04 (0.89)	3.58 ~ 7.08 (5.33)	0.70 ~ 8.7 (4.70)	0.04 ~ 0.09 (0.06)	0.11 ~ 0.20 (0.16)
深海骨螺	6	3.77 ~ 10.56 (8.06)	0.51 ~ 1.02 (0.76)	0.63 ~ 1.04 (0.80)	3.11 ~ 8.09 (6.34)	1.49 ~ 10.91 (8.00)	0.06 ~ 0.14 (0.10)	0.01 ~ 0.50 (0.22)
马夫鱼	3	3.22 ~ 6.39 (4.76)	1.59 ~ 3.16 (2.39)	ND ~ 2.47 (2.43)	3.78 ~ 5.77 (4.83)	3.22 ~ 6.37 (4.35)	0.02 ~ 0.13 (0.06)	0.07 ~ 0.20 (0.12)
新月鹦嘴鱼	6	5.33 ~ 10.77 (9.02)	0.52 ~ 3.04 (1.52)	0.68 ~ 3.13 (1.66)	5.21 ~ 13.28 (10.39)	4.09 ~ 80.09 (60.53)	0.09 ~ 0.31 (0.20)	0.03 ~ 0.22 (0.17)
<sup>a</sup> 海洋生物污染评价标准 <sup>[16]</sup>		6.00		80.00	160.00	20.00	8.00	1.20
<sup>a</sup> NY5073-2001 <sup>[18]</sup>		8.00		200.00		20.00 <sup>b</sup>	2.00	4.00
<sup>a</sup> GB2762-2005 <sup>[19]</sup>		8.00		200.00		20.00 <sup>b</sup>	2.00	
<sup>a</sup> 人体消费卫生标准 <sup>[20]</sup>		22.00		400.00	600.00		6.00	
<sup>a</sup> WHO <sup>[17]</sup>			4.00	120.00	400.00			2.00

注: ND 表示未检出; <sup>a</sup>表中各类标准均按照 4:1 换算为干重标准; <sup>b</sup>无机砷按照 1:10 换算成总砷的含量

体内对 Mn 的蓄积水平最高,对其他重金属蓄积水平均最低,这可能与其生理特性有关。

珊瑚礁区的 5 种鱼类肌肉对不同重金属的富集能力存在显著差异。其中,Cu、Zn、Pb 在鱼体肌肉中最低,这与陆超华<sup>[23]</sup>对南海北部海域水产品中的研究结果一致。本次研究结果表明,生物富集作用最明显的是 As 和 Cr。尤其是新月鹦嘴鱼肌肉体内的 As 含量高于标准限值( $20.00 \times 10^{-6}$ ,干重)达 4 倍多,同时该类鱼体肌肉中 Cr 的含量也分别高于标准限值( $8.00 \times 10^{-6}$ ,干重)达 1 倍多。

与其他地区的海鱼相比(表 2),海南珊瑚礁鱼类的重金属污染类型与其他 5 个海域污染类型不同。海南珊瑚礁鱼类重金属污染以 Cr、As 为主,且 Cr 和 As 含量远远高于其他 5 个海域;拓林湾鱼类重金属污染以 Cu、Pb 为主;葫芦岛鱼类重金属污染以 As 为主。珠江河口和胶州湾的海鱼重金属含量则普遍较低。这一方面是由于海南珊瑚礁鱼的种类与其他区域海鱼种类不同,不同种类鱼体富集重金属能力有所不同;另一方面是由各区域重金属污染程度不同造成。

表 2 不同海域海鱼中重金属含量水平比较  
Tab. 2 Comparison of heavy metal levels in marine fish in different ocean area

评价区域	$w/10^{-6}$ (干重)				
	Cr	Cu	Zn	As	Pb
拓林湾 <sup>[24]</sup>	2.02	63.13	75.14		6.27
湛江海域 <sup>[25]</sup>	1.56	2.68	58.40		5.08
珠江河口 <sup>[26]</sup>		2.12	15.68		0.12
胶州湾 <sup>[15]</sup>		2.00	22.12		2.52
葫芦岛海域 <sup>[27]</sup>		9.67	78.41	3.98	0.55
海南珊瑚礁(本研究)	6.7	1.26	6.36	16.69	0.11

注: ND 表示未检出。参考文献中湿重按干湿比 1:4 换算成干重含量

2.2 重金属在鱼类不同组织中的分布

由于单斑笛鲷内脏和鳃样品缺失,故选取其他 4 种鱼类的肌肉、内脏和鳃器官,分析其中的 6 种重金属含量,结果如图 1。同一重金属元素在鱼体内不同器官中的分布差异显著。如 Mn 和 Zn 在鱼体不同器官中含量大小顺序均为:鳃 > 内脏 > 肌肉;Cu 在鱼体不同器官中含量大小顺序为:内脏 > 鳃 > 肌肉,这与 Cu 在鲫鱼体内的积累规律一致<sup>[28]</sup>;除新月鹦嘴鱼外,As 在鱼体不同器官中含量大小顺序为:内脏、鳃 > 肌肉。这说明鱼体不同器官对重金属的蓄积能力不同。除新月鹦嘴鱼外,其他 3 种鱼体鳃和内脏器官容易蓄积 Cu、Pb、Mn、Zn、As。影响重

金属在生物体内富集的因素很多,包括重金属元素的性质、生物种类、生物发育的不同阶段以及食物链等<sup>[8]</sup>。不同种类的鱼体各器官对同一种重金属的富集能力也不同。以 Pb 为例,Pb 在斑鳍鲷中主要富集在鳃,而在其他 3 种海鱼中则主要富集在内脏,这说明斑鳍鲷对 Pb 的吸收以鳃为主,而其他 3 种海鱼则以摄食为主吸收 Pb<sup>[29]</sup>。

2.3 污染评价

本研究中珊瑚礁区鱼类食用部分(肌肉)重金属污染评价指数计算结果如表 3。

从表 3 中鱼类肌肉组织中重金属的单因子污染指数的平均数来看,不同重金属的污染程度由强到弱的顺序

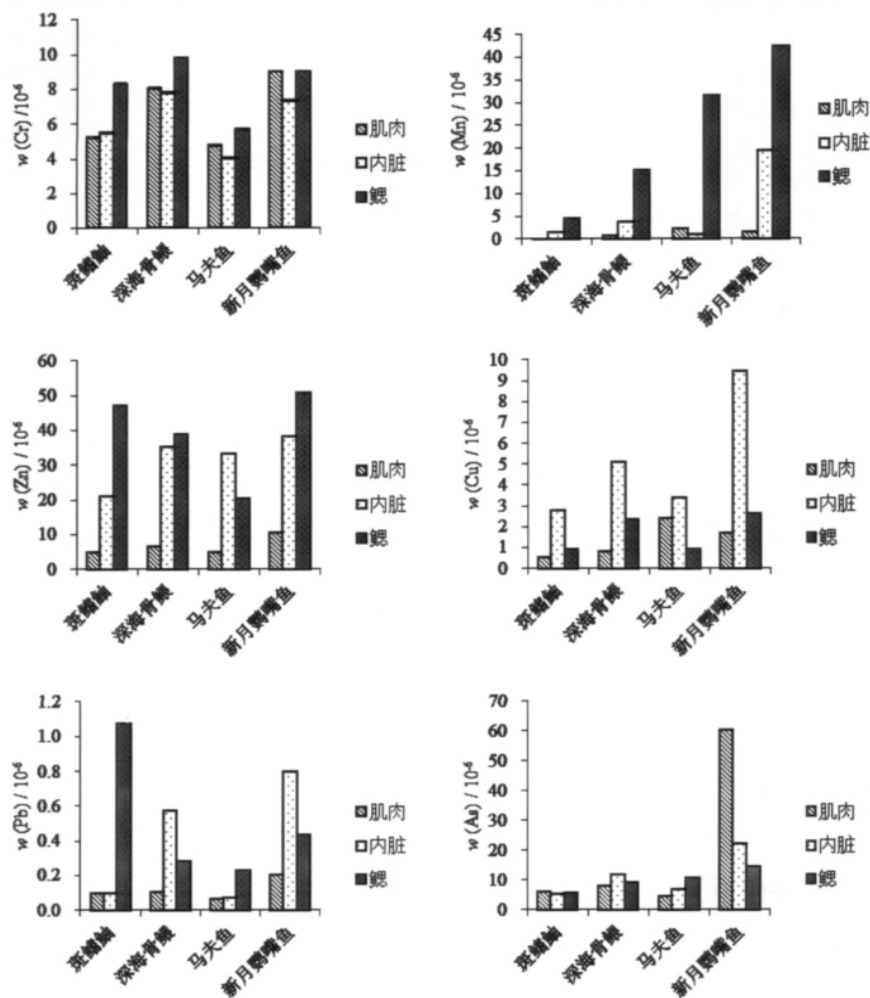


图 1 珊瑚礁区中 4 种鱼不同组织中重金属的分布

Fig. 1 Distribution of heavy metals in different tissue of four fish from coral reef ecosystem

表 3 珊瑚礁区中鱼类食用部分重金属污染指数

Tab. 3 Pollution index of heavy metals in the edible parts of wild fish from coral reef ecosystem

鱼种类	$P_i$						
	Cr	Mn	Cu	Zn	As	Pb	Hg
斑鳍鲷	0.86	0.12	0.01	0.03	0.29	0.01	0.31
单斑笛鲷	1.08	0.10	0.01	0.03	0.24	0.01	0.13
深海骨鯧	1.34	0.19	0.01	0.04	0.40	0.01	0.18
马夫鱼	0.79	0.60	0.03	0.03	0.22	0.01	0.10
新月鹦嘴鱼	1.50	0.38	0.02	0.06	3.03	0.03	0.14
平均值	1.12	0.28	0.02	0.04	0.83	0.01	0.17

为:  $Cr > As > Mn > Hg > Zn > Cu > Pb$ 。其中,  $Cr$  的  $P_i$  值大于 1, 属于重度污染;  $As$  的  $P_i$  值介于 0.6 ~ 1.0 之间, 属于中度污染;  $Mn$  的  $P_i$  值介于 0.2 和 0.6 之间, 属于轻度污染;  $Hg$ 、 $Zn$ 、 $Cu$  和  $Pb$  的  $P_i$  值都小于 0.2, 属于无污染。这说明珊瑚礁区重金属污染生态风险以  $Cr$  和  $As$  为主。海南珊瑚礁区  $Cr$  和  $As$  污染的来源极可能与当地农业活动有关。赵志忠等研究发现海南岛西部农用地表层土壤中  $As$  元素达到严重富集<sup>[30]</sup>。李富燕对海南省农业用地重金属污染现状进行调查, 发现海南岛农业用地中  $Hg$ 、 $Cd$ 、

$Cr$ 、 $Pb$  和  $As$  等 5 种重金属平均含量均超过国家环境质量二级标准 (GB 15618-1995)<sup>[31]</sup>。海南省鱼体中重金属的污染可能主要来自农业生产中使用的含重金属的化肥和农药。另外, 较发达的水产养殖业中饲料和排泄物、港口船舶废水以及城市生活污水也是重金属的重要来源。

3 结 论

珊瑚礁区中的斑鳍鲷、单斑笛鲷、深海骨鯧、马夫鱼、新月鹦嘴鱼 5 种鱼体肌肉中  $Mn$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Pb$  和  $Hg$  5 种元

素含量均在安全范围内,而 Cr 超过安全范围;新月鹦嘴鱼肌肉中 Cr 和 As 超过安全范围。

珊瑚礁区中鱼体对不同重金属的富集能力存在显著差异。生物富集作用最明显的是 As 和 Cr。

珊瑚礁区中鱼体内不同器官对重金属元素的富集作用差异显著,鱼体鳃和内脏器官容易蓄积重金属。

从鱼类肌肉组织中重金属的单因子污染指数来看,不同重金属的污染程度由强到弱的顺序为:  $\text{Cr} > \text{As} > \text{Mn} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb}$ 。海南珊瑚礁区重金属 Cr 污染严重,As 中度污染, Mn 轻度污染, Hg、Zn、Cu 和 Pb 无污染。

致谢:感谢王宽诚教育基金会对本工作的资助!感谢中国科学院地球化学研究所冯新斌研究员和环境保护部华南环境科学研究所陈来国博士的帮助!

#### 参考文献:

- [1] 周祖光. 海南珊瑚礁的现状与保护对策[J]. 海洋开发与管 理, 2004(6): 48-51.
- [2] 黄德银, 施 祺, 张叶春. 三亚湾滨珊瑚中的重金属及环境意义[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(3): 35-38.
- [3] 张宇峰, 武正华, 王 宁, 等. 海南南岸港湾海水和沉积物重金属污染研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003(1): 81-90.
- [4] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 186-194.
- [5] SCOTT P J B. Chronic pollution recorded in coral skeletons in HongKong[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1990, 139(1/2): 51-64.
- [6] ANU G, KUMAR N C, JAYALAKSHMI K V, et al. Monitoring of heavy metal partitioning in reef corals of Lakshadweep Archipelago, Indian Ocean[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 128(1/2/3): 195-208.
- [7] DAVID C P. Heavy metal concentrations in growth bands of corals: A record of mine tailings input through time( Marinduque Island, Philippines) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(2): 187-196.
- [8] 尚晓迪, 何志强. 重金属在鱼体内积累作用的研究进展[J]. 河北渔业, 2009(5): 44-45.
- [9] TURKMEN M, TURKMEN A, TEPE Y, et al. Determination of metals in fish species from Aegean and Mediterranean seas[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 233-237.
- [10] AUTHMAN M M N. Oreochromis niloticus as a biomonitor of heavy metal pollution with emphasis on potential risk and relation to some biological aspects[J]. Global Veterinaria, 2008, 2(3): 104-109.
- [11] ZHOU Q, ZHANG J, FU J, et al. Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 606(2): 135-150.
- [12] GB 17378-2007, 海洋监测规范第6部分: 生物体分析[S].
- [13] TUZEN M. Toxic and essential trace elemental contents in fish species from the Black Sea, Turkey [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(8): 1785-1790.
- [14] 王翠萍, 闫海鱼, 刘鸿雁, 等. 使用 Lumex 测汞仪快速测定固体样品中总汞的方法[J]. 地球与环境, 2010(3): 378-382.
- [15] 崔 毅, 陈碧娟, 宋云利, 等. 胶州湾海水、海洋生物体中重金属含量的研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 650-654.
- [16] 王化泉, 贾晓平, 林燕棠. 关于海洋生物污染评价若干标准的初步探讨[C]//广东省海岸带和海涂资源调查文集(2). 广州: 广东科技出版社, 1984: 132-141.
- [17] WHO. Heavy metals environmental aspects, in Environment Health Criteria[S]. Switerland: Geneva, 1989.
- [18] NY 5073-2001, 无公害食品水产品中有毒有害物质限值[S].
- [19] GB 2762-2005, 食品中污染物限值[S].
- [20] ANON G. Report on revised standard for metals in food: Appendix IV [R]. Canberra: Commonwealth Government Printer, 1979: 69-70.
- [21] BASHIR F A, SHUHAIMI-OTHMAN M, MAZLAN A G. Evaluation of trace metal levels in tissues of two commercial fish species in Kapar and Mersing coastal waters, Peninsular Malaysia [J]. Journal of Environmental and Public Health, 2012: 1-10.
- [22] BALASUBRAMANIAN S, PAPPATHI R, BOSE A J, et al. Bioconcentration of copper, nickel and cadmium in multicell sewage fed fish ponds [J]. Journal of Environmental Biology, 1997, 18(2): 173-179.
- [23] 陆超华. 南海北部海域经济水产品的重金属污染及其评价[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(2): 12-19.
- [24] 李张伟, 郭婷子. 粤东拓林湾海产动物的重金属污染检测与评价[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(5): 664-667.
- [25] 陈 蓉, 徐忠贤, 张 琳, 等. 湛江港海域经济水产品重金属含量及评价[J]. 黄渤海海洋学报, 1998(4): 55-60.
- [26] 王增焕, 李纯厚, 林 钦, 等. 珠江河口经济动物体铜铅锌镉的含量[J]. 湛江海洋大学学报, 2003(3): 33-38.
- [27] 岳丽娟, 史宝成. 葫芦岛市近岸海域水生动物重金属污染状况的监测[J]. 中国环境监测, 2001(4): 45-48.
- [28] 贺 亮. 铜在鲫鱼中的积累机制及其影响因素的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [29] 杨妙峰, 郑盛华, 郑惠东, 等. 近岸海域环境中鱼体对重金属污染物的响应浅析[J]. 福建水产, 2010(4): 50-55.
- [30] 赵志忠, 王 鹏, 赵广儒, 等. 海南岛西部农用地表层土壤重金属富集研究[J]. 生态环境学报, 2012(1): 136-139.
- [31] 李福燕. 海南岛农用地重金属污染现状调查与评价研究[D]. 海南: 海南大学, 2010.